

## Библиографический список

1. Кирьянов Д.В. Mathcad – 12 / Д.В. Кирьянов / СПб.: БХВ – Петербург. – 2005. – 576 с.
2. Алексеев Е.Р. Mathcad – 12 / Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова / М.: NT Press. – 2005. – 345 с.
3. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат. – 1963. – 535 с.
4. Уголев Б.Н. Контроль напряжений при сушке древесины / Б.Н. Уголев, Ю.Г. Лапшин, Е.В. Кротов. – М.: Лесная промышленность. – 1980. – 206 с.
5. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г.С. Шубин. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 336 с.
6. Скуратов Н.В. Разработка рациональных режимов сушки пиломатериалов в камерах периодического действия: дисс. ... канд. техн. наук / Скуратов Николай Владимирович. – М.: МЛТИ. – 1983. – 257 с.
7. Красухина Л.П. О рациональных режимах сушки березовых пиломатериалов в камерах периодического действия / Л.П. Красухина // Деревообрабатывающая промышленность. – 1988. – № 6. – С. 5 - 7.
8. Серговский П.С. Новые режимы сушки осиновых пиломатериалов / П.С. Серговский, А.А. Фахретдинов // Деревообрабатывающая промышленность. – 1991. – № 1. – С. 4 - 7.
9. Огаркова Т.В. Влияние влаги на коэффициент усушки древесины / Т.В. Огаркова // Сушка древесины. – Архангельск. – 1968. – с. 201 – 206.
10. Огаркова Т.В. Влияние гигроскопической влаги на коэффициент усушки древесины / Т.В. Огаркова // Изв. ВУЗов “Лесной журнал”. – 1964. - № 3.
11. Глухих В.Н. Аналитическое определение коэффициента усушки по ширине доски / В.Н. Глухих // Изв. ВУЗов “Лесной журнал”. – 1973. - № 4.

**Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. (ОАО «УралНИИПДрев»,  
УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ) [elenashishkina@yandex.ru](mailto:elenashishkina@yandex.ru)**

## **РАСЧЕТ СКОРОСТИ АГЕНТА СУШКИ В КАМЕРАХ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ**

### ***THE CALCULATION OF DRYING AGENT SPEED IN CHAMBER WITH NATURAL CIRCULATION***

Постоянное повышение цен на электроэнергию в последние годы заставило производителей [1] и исследователей [2] вновь обратиться к использованию для сушки пиломатериалов камер с естественной циркуляцией агента сушки, которые не потребляют электроэнергию на привод вентиляторов. К другим преимуществам камер этого типа можно отнести:

- простоту конструкции и более низкую стоимость камеры;

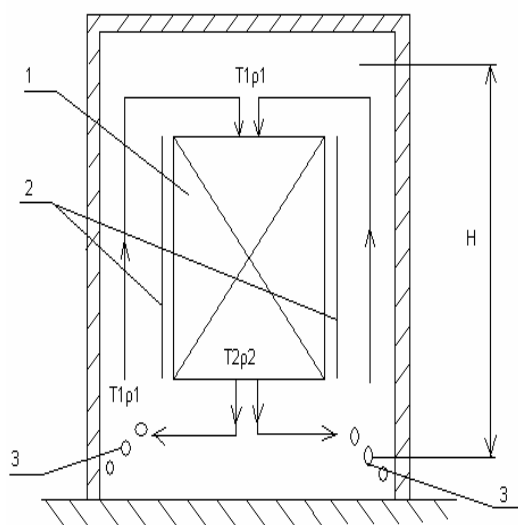
- более низкую амортизацию и эксплуатационные затраты.

Недостатки камер с естественной циркуляцией хорошо известны и могут быть успешно преодолены современными техническими средствами [1, 2].

В то же время анализ ранее проведенных исследований [3, 4, 5, 6] показывает, что процессы естественной циркуляции с теоретической стороны проработаны явно недостаточно.

В основе разработанных методик определения параметров, в первую очередь скорости естественной циркуляции [3, 5, 7] лежит гидравлическая теория движения газов, разработанная В.Е. Грум-Гржимайло [8].

Согласно [3] процесс циркуляции возникает вследствие разности весов столбов воздуха, охлажденного в штабеле и нагретого в калорифере (рис. 1).



1 – штабель; 2 – экраны; 3 – калориферы

Рисунок 1 – Схема естественной циркуляции воздуха в лесосушильной камере

Статический напор, создаваемый при этом равен

$$\Delta P_{ст} = Hg (\rho_{ср.шт.} - \rho_1), \text{ Н/м}^2 \quad (1)$$

где  $H$  – высота столба нагретого воздуха, м;

$\rho_1$  – плотность воздуха, нагретого в калорифере (на входе в штабель),  
кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{ср.шт.}$  – средняя плотность воздуха в штабеле, кг/м<sup>3</sup>.

Среднюю плотность воздуха в штабеле можно определить как:

$$\rho_{ср.шт.} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}, \quad (2)$$

где  $\rho_2$  – плотность воздуха на выходе из штабеля, кг/м<sup>3</sup>.

После преобразований Н.С. Селюгин [3] предлагает следующую формулу для определения скорости естественной циркуляции:

$$V = \sqrt{\frac{\Delta t H g}{T_1 \cdot \sum \xi}}, \text{ м/с} \quad (3)$$

где  $\Delta t$  – перепад температуры воздуха на штабеле,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_1$  – абсолютное значение температуры воздуха на входе в штабель,  $^{\circ}\text{K}$ ;

$\Sigma \xi$  – сумма коэффициентов сопротивлений движению воздуха.

Практически  $\Sigma \xi = \xi_{\text{шт.}}$

где  $\xi_{\text{шт.}}$  – коэффициент сопротивления штабеля.

В [9] есть ряд эмпирических формул и номограмм, позволяющих определять  $\xi$  для различных случаев сушки.

Таким образом, существующая методика определения скорости естественной циркуляции не учитывает некоторых новых представлений об аэродинамике, например:

- наличие помимо статического напора столба нагретого воздуха динамического напора в плоской струе над нагревателем;
- в [3] коэффициент сопротивления штабеля зависит от параметров штабеля, в то время как он, в первую очередь зависит от квадрата скорости циркуляции воздуха;
- применение ребровой укладки пиломатериалов [9] помимо резкого снижения коэффициентов сопротивления требует изменения подхода к точному определению их величины.

Динамическая составляющая напора появляется в результате возникновения над источником тепла (калорифером) свободной плоской конвективной струи (рис. 2). Автор теории свободных конвективных струй является Г.Н. Абрамович [10, 11, 12].

В конвективной струе различают три участка: разгонный ABFE, переходный BCGF и основной DCGH.

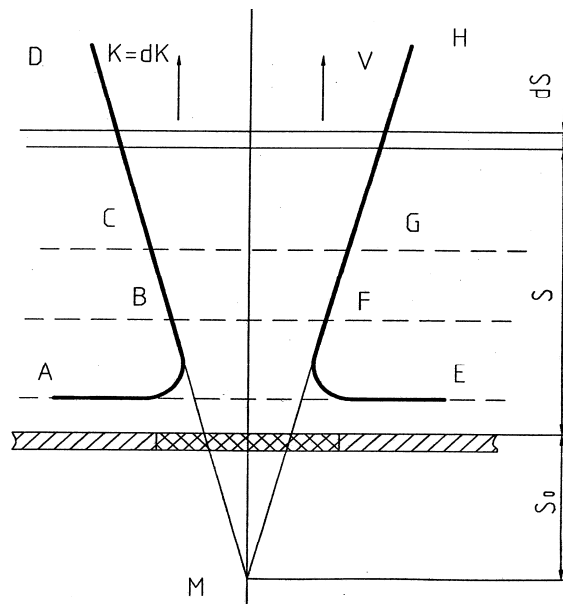


Рисунок 2 – Схема свободной конвективной струи

Если выделить в струе на расстоянии  $S$  от источника тепла элементарный слой толщиной  $dS$ , то применительно к этому объему можно написать уравнение количества движения в проекциях на оси струи:

$$dK = - dR_a, \quad (4)$$

где  $K$  – количество движения, проходящего через сечение, удаленное на расстояние  $S$  от источника тепла;

$R_a$  – архимедова сила.

Средняя скорость в поперечном сечении струи:

$$V_{cp} = \sqrt{\frac{K}{0,44 \beta \rho_1 (S - S_0)}}, \text{ м/с} \quad (5)$$

где  $\beta$  – коэффициент Буссинеска, м·с;

$\rho = \rho_1$  – плотность окружающего струю воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$S_0 = -2 B_0$  – абсцисса полюса струи;

$B_0$  – полуширина струи в сечении АЕ.

После преобразований выражение для определения средней скорости струи приобретает вид:

$$V_{cp} = \sqrt[3]{\frac{g Q_0}{0,44 c \beta \beta_{\Delta t} \rho_1 T_1}}. \quad (6)$$

где  $T_1$  – абсолютная температура нагревателя, °К;

$c$  – теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ , – ускорение свободного падения;

$Q$  – линейная тепловая мощность калорифера, кВт/м;

$\beta_{\Delta t}$  – температурный аналог коэффициента Буссинеска, с<sup>-1</sup>.

Согласно [13] потеря давления в воздуховоде произвольного сечения:

$$\Delta P = \lambda \frac{Pl}{4F} \cdot \frac{\rho V_{cp}^2}{2}, \text{ н/м}^2 \quad (7)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трения;

$l$  – длина воздуховода, м;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{cp}$  – средняя скорость воздуха, м/с;

$P$  – периметр воздуховода, м;

$F$  – площадь сечения воздуховода, м<sup>2</sup>.

Для штабеля:

$$\Delta P_{шт} = \lambda S_{шт} \frac{h_{шт} \rho V_{cp}^2}{2 d_{экв}}, \text{ Н} \quad (8)$$

где  $h_{шт}$  – высота штабеля;

$$S_{шт} = \frac{b \cdot B_{шт} \cdot L_{шт}}{S_{\delta} + b}, \text{ м}^2 \quad \text{– суммарная площадь воздушных каналов}$$

штабеля, м<sup>2</sup>;

$B_{шт}$ ,  $L_{шт}$  – ширина и длина штабеля, м;

$S_{\delta}$  – толщина доски, м;

$b$  – толщина прокладки, м;

$$d_{экв} = \frac{2ab}{a+b}, \text{ м};$$

$a$  – расстояние между прокладками, м.

Процесс циркуляции в установившемся режиме может быть описан следующим уравнением баланса:

$$\Sigma P_n = \Delta P_{ст} + \Delta P_{дин}, \quad (9)$$

где  $\Sigma P_n$  – суммарные потери напора, Н.

С учетом (1), (3), (6), (8) после преобразований получим:

$$V_u = \sqrt{\frac{S_k \left( Hg \frac{\rho_2 - \rho_1}{2} + \sqrt[3]{\frac{g^2 Q_0^2 (\rho_1 - \rho_2)^3}{12,4 \beta^2 \beta_{\Delta t}^2 c^2 \rho_1^2 T_1^2}} \right)}{S_{шт} \left( \frac{\rho_1 + \rho_2}{4} + \frac{\lambda \rho_1 h_{шт}}{2 d_{экв}} \right)}}, \text{ м/с} \quad (10)$$

Если принять  $\rho_1 = 0,878 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_2 = 0,909 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_1 = 353 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $H = 3 \text{ м}$ ,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ,  $Q_0 = 10 \text{ кВт/м}$ ,  $c = 1 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ ,  $h_{шт} = 2,5 \text{ м}$ ,  $\lambda = 0,032$ ,  $\beta = 1,56 \text{ м} \cdot \text{с}$ ,  $\beta_{\Delta t} = 1,36 \text{ с}^{-1}$ ,  $d_{экв} = 0,049 \text{ м}$ ,  $S_k = 6 \text{ м}^2$ , (значения  $S_{шт}$  принимаем по [3]), то получим следующие значения скорости циркуляции (табл.).

Таблица – Скорость естественной циркуляции агента сушки в штабеле пиломатериалов

Толщина доски, мм	19	22	25	32	40	50	60	75
Скорость циркуляции, м/с	0,717	0,742	0,761	0,813	0,878	0,926	1,004	1,076

Данные табл. 1 показывают, что при выбранной конструкции штабеля [9] скорость циркуляции:

- существенно выше распространенных в литературе 0,2 м/с;
- определяется, главным образом, толщиной пиломатериалов, подвергающихся сушке (при постоянной толщине прокладок и линейной мощности нагревателя).

### Выводы

Разработана методика расчета параметров процесса естественной циркуляции агента сушки с учетом статической и динамической составляющих теплового напора, а также влияния параметров штабеля пиломатериалов на коэффициент его аэродинамического сопротивления.

### Библиографический список

1. Камеры СПК-12: Начало положено // Дерево RU. – 2006. – № 3. – С. 62 -63.
2. Шишкина Е.Е. Сушка пиломатериалов в камерах малой мощности с естественной циркуляцией воздуха: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Шишкина Елена Евгеньевна. – СПб.: СПбЛТА им. С.М. Кирова. – 2006.
3. Селюгин Н.С. Сушка древесины / Н.С. Селюгин. М.-Л., Гослестехиздат, 1949.

4. Кречетов Н.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. – М. – Л.: Гослесбумиздат. – 1949.
5. Андропова Н.А. Сушка и сушилка для дерева / Н.А. Андропова. – М.: ОНТИ. – 1936.
6. Грум-Гржимайло В.Е. Основы правильной конструкции сушил / В.Е. Грум-Гржимайло // Изв. Горного ин-та – Свердловск. – вып. 7. – 1920.
7. Альтшулер И.С. Расчет сушильных камер для древесины. / И.С. Альтшулер. – М.: Гослесбумиздат. – 1953.
8. Бардин И.П. Элементарная теория построения металлургических печей. / И.П. Бардин, В.Е. Грум-Гржимайло. – М. – Л.: изд. АН СССР, 1949.
9. Агапов В.П., Гороховский А.Г. Устройство для сушки пиломатериалов / Патент РФ на полезную модель № 37815 от 10.05.2004.
10. Абрамович Г.Н. Теория свободной струи и ее приложения. / Г.Н. Абрамович. – Труды ЦАГИ, вып. 293 – М., 1936.
11. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. / Г.Н. Абрамович. – Труды ЦАГИ, вып. 512 – М., 1940.
12. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. / Г.Н. Абрамович. – М.: Физматиздат, 1960.
13. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции. / В.Н. Талиев. – М.: Стройиздат, 1979.

**Глухих В.Н. (СПбГЛТА, г. Санкт-Петербург, РФ)**

## **УПРУГАЯ ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ПОПЕРЕК ВОЛОКОН С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ ДРЕВЕСИНЫ**

### **THE ELASTIC DEFORMATION ACROSS FIBRES IN VIEW OF WOOD ANISOTROPY**

Упругая деформативность древесины характеризуется величиной обратной модулю упругости и изменяется в зависимости от угла наклона годичного слоя к пласти доски.

Для хвойных и лиственных пород анизотропия деформативности поперек волокон очень велика, но характер изменения упругих постоянных по сечению примерно одинаковый. Это проанализировано в работах Е.К. Ашкенази [1], [2], А.Н. Митинского [9], Н.Л. Леонтьева [7], С.Г. Лехницкого [8] и др. Использование полученных в работах [1], [8], [9] формул для вычисления постоянных упругости затруднено из-за применения ряда экспериментально определяемых величин, несовершенство методики исследования которых признают и сами авторы. К этим величинам относятся коэффициенты поперечной деформации, модули сдвига, модуль упругости  $E_{xy}^{45}$ .

Получение модуля упругости  $E_{xy}^{45}$  теоретическим путем значительно упростило бы задачу исследования деформативности древесины поперек волокон.